



**Les moteurs à cycles asymétriques, une approche énergétique efficiente en phase avec les nouveaux enjeux technico-économiques**

**Cas du moteur 5 temps SWG**

Frédéric SIROT  
Directeur de branche  
[fredéric.sirot@danielson-eng.fr](mailto:fredéric.sirot@danielson-eng.fr)

Programme soutenu par :



## Résumé de l'intervention

A l'issue d'une courte introduction portant sur les enjeux stratégiques de la réduction de consommation des moteurs thermiques, Danielson Engineering présente succinctement les intérêts des moteurs à cycles asymétriques.

Une attention particulière sera portée sur le concept de "Moteur 5 temps à Smart WasteGate" au travers des travaux menés conjointement par Danielson Engineering et le laboratoire ID-Motion depuis 3 années :

- Approche théorique et conclusions d'un programme de modélisation 3D de ce cycle prometteur.
- Résultats expérimentaux obtenus au banc d'essais sur un moteur démonstrateur prototype.

Le positionnement technico-économique de ce concept comparativement à des approches concurrentes de valorisation de l'enthalpie à l'échappement sera abordé.

En conclusion, les applications potentielles du concept "Moteur 5 temps à Smart WasteGate" dans les domaines de l'aéronautique, du off-road, des transports maritimes et terrestres et plus particulièrement à destination de l'industrie automobile seront décrites.

## Summary

Following a short introduction about the strategic interest in reducing the fuel consumption of combustion engines, DE will briefly discuss the advantages of asymmetrical cycle engines.

A particular focus will be the concept of the “Smart WasteGated 5 stroke engine” through the studies jointly performed for the last 3 years by DE and the ID Motion laboratory :

- Theoretical approach and conclusions of the 3D modeling campaign for this promising cycle,
- Experimental results on a prototype proof of concept engine.

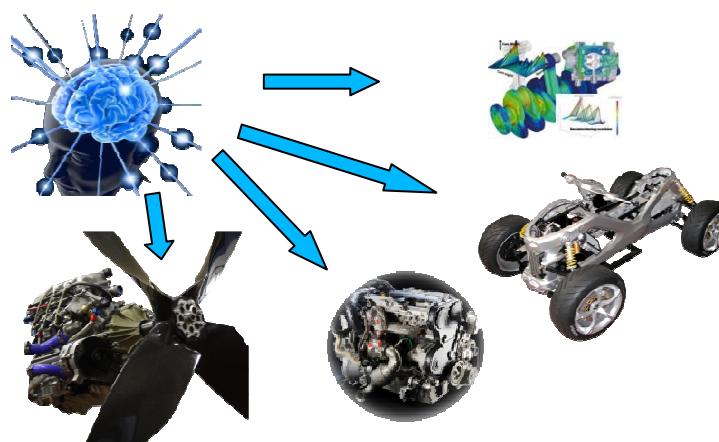
This concept will be compared on a technological and economical field to other concepts for recovering exhaust enthalpy.

As a conclusion, the potential applications of the “Smart WasteGated 5 stroke engine” will be described, in the fields of aeronautics, off road vehicles, maritime and ground transport, and especially of the automotive industry.



- 1. Danielson Engineering et Everest TEAM**
- 2. Le laboratoire ID-Motion**
- 3. Les enjeux stratégiques de la réduction des émissions de CO2 pour l'industrie automobile**
- 4. Les moteurs à cycles asymétriques**
- 5. Le concept « moteur 5 temps SWG »**
- 6. Programme « Proof of concept moteur 5T-SWG laboratoire »**
- 7. Optimisation numérique du moteur 5T-SWG**
- 8. Analyse comparative du concept 5T-SWG**
- 9. Les applications industrielles potentielles**

# 1. Danielson Engineering et Everest TEAM





## Danielson en chiffres :

- 120 Personnes
- 30 Ingénieurs et Docteurs
- 50 techniciens
- 7 sociétés (France et Inde)

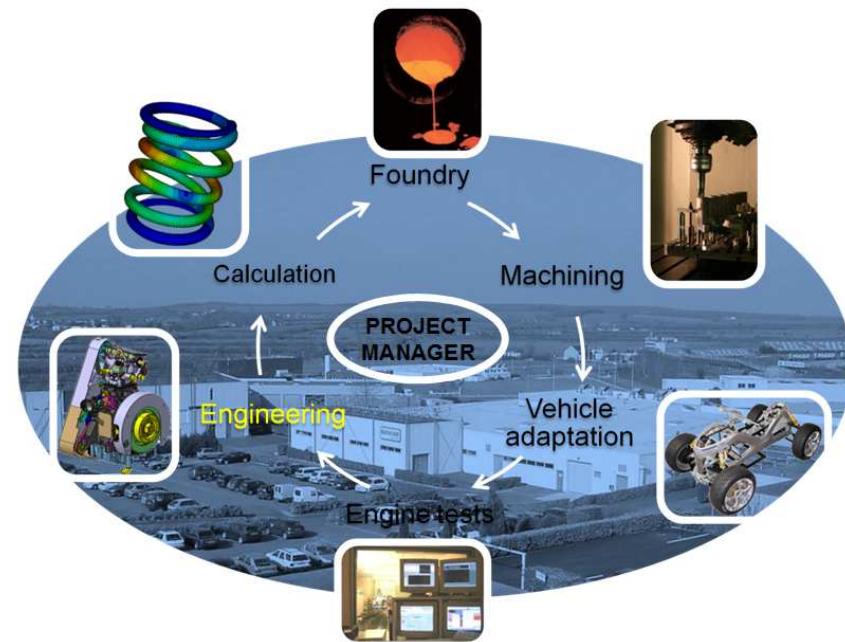


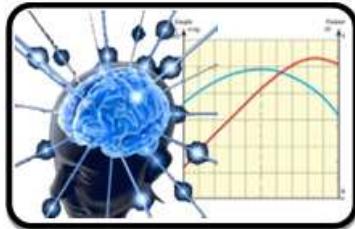
## Domaine d'expertise :

- Développement de concepts innovants
- Prestations de services pour les grands comptes
- Développement et Commercialisation de produits propres
- Moyens d'essais spécifiques
- Proposition de concepts innovants

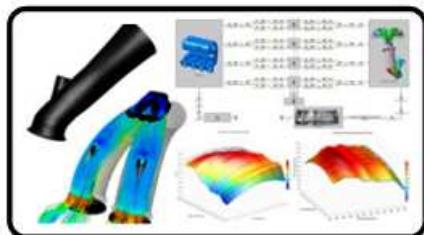
## Clients par secteurs d'activités :

- Automobile (PSA, Renault, Valéo, MCE5, ...)
- Aéronautique (Eurocopter, Sma, Turboméca, Liebherr)
- Défense (Nexter, Sagem, Thales, ...)
- Spatial (Astrium)
- Off road (John-Deere, Claas, ...)
- Racing (Renault F1, Citroën Racing, Peugeot Sport, ...)
- Energie (Areva, Siemens, General Electric, ...)

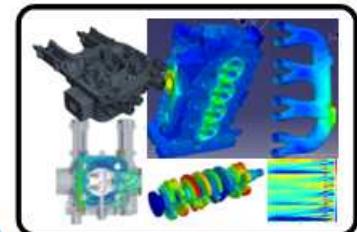
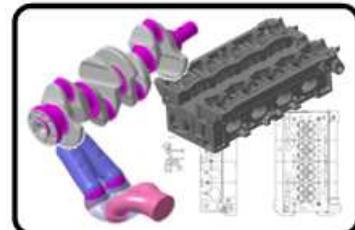
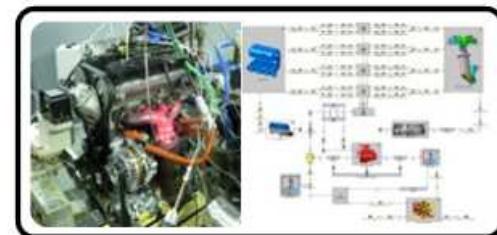




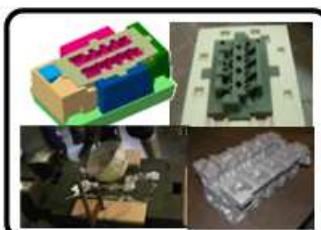
*De l'idée... au démonstrateur  
technologique*



Validation



Conception,  
Optimisation &  
Développement



Montage,  
Tests &  
Intégration



EVEREST TEAM est un Groupement d'Intérêt Economique regroupant  
7 sociétés et laboratoires disposant de compétences complémentaires  
dans le secteur de la Recherche et du Développement



- ✓ Programme pluridisciplinaire pris en charge par 1 Chef de Projet
- ✓ Nombreux domaines d'expertises
- ✓ Equipements de pointe
- ✓ Entièrement intégré
- ✓ Industrialisation



**Everest Team est un acteur majeur de la R&D  
sur la thématique Powertrain**



**Programmes complets**

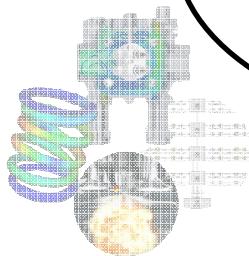
**pluridisciplinaires :**

Engineering

Calcul

Prototypage

Essais



- **Une expertise complète**
- **Compétences reconnues**
- **220 employés, 60 ingénieurs et docteurs, 100 techniciens**
- **Equipements de pointe**
- **Spécialisé dans l'engineering Powertrain**
- **Secteurs d'activités : Automobile, Trucks, Off Road, Aéronautique, Défense et Energie**



## 2. Le laboratoire ID-MOTION



# Le laboratoire IDMOTION

ID motion est un laboratoire public/privé de recherche

Une université et une école d'ingénieurs



Une société d'engineering



**id**  
**motion**  
AUTOMOTIVE  
& TRANSPORT  
RESEARCH



**danielson**  
Engineering

# Le laboratoire IDMOTION



<b>Président :</b>	Bernard DELAPORTE
<b>Directeur scientifique :</b>	Professeur Luis Le MOYNE
<b>Comité scientifique :</b>	ISAT / Danielson Engineering
<b>Type de recherches :</b>	Appliquées
<b>Secteur d'activité :</b>	Automobile, Transports, Energie
<b>Principales thématiques déjà traitées :</b>	
- Moteur 5 temps (Doctorant : Clément AILLOUD)	
- Valorisation de l'enthalpie (Moteur Stirling)	
- Modélisation 3D de combustions propres alternatives	

## Les partenaires de ID MOTION





### **3. Les enjeux stratégiques de la réduction de CO<sub>2</sub> pour l'industrie automobile**





### Les enjeux de la réduction de CO2 sont principalement de 2 ordres :

- les enjeux environnementaux
- les enjeux économiques pour l'industrie automobile

### Les enjeux environnementaux :

- Le CO2 contribue à l'effet de serre à hauteur de 55%
- Les transports produisent 14% des émissions de C02
- Le CO2 émis par les transports contribuent à hauteur de 8% dans le phénomène d'effet de serre
- La consommation en carburant des véhicules automobiles est directement proportionnelle à l'émission de C02
- Une réduction de la consommation est donc plus que jamais nécessaire



## Les enjeux économiques pour l'industrie automobile :

**La réglementation devient de plus en plus contraignantes.**

**Les constructeurs automobiles sont incités à poursuivre leurs efforts de réduction de la consommation de leurs véhicules.**

Le Point.fr - Publié le 13/07/2012 à 10:52 - Modifié le 13/07/2012 à 11:04

### L'Europe veut taxer le gramme de CO2 au prix de l'or

Bruxelles pousse les constructeurs à développer des voitures hybrides rechargeables et électriques selon une règle digne de Kafka.



Par YVES MAROSELLI

Nous le redisons dans un précédent article et nous avons raison. L'Union européenne vient d'accoucher d'une nouvelle contrainte sur les émissions de CO2 qui va donner quelques migraines aux bureaux d'études. Comme si les constructeurs n'avaient pas assez de soucis, l'administration des 27, se souvenant des problèmes de mathématiques où des baignoires se vident et où les trains n'arrivent jamais à l'heure, a arrêté une nouvelle règle sur les émissions de CO2 pour 2020. Elle est ultracomplexe, comme seuls les fonctionnaires modernes et informatisés peuvent en produire, mais en voici une synthèse.

À partir de 2015, c'est-à-dire demain à l'échelle d'une industrie lourde, les constructeurs automobiles devront payer des amendes si la moyenne des émissions de CO2 de leurs véhicules vendus sur le Vieux Continent dépasse l'objectif fixé par l'Union européenne. Cet objectif est de 130 g/km (correspondant à une consommation moyenne de 5,5 l/100 km d'essence ou de 4,9 l/100 km de gazole) en 2015,

mais sera réduite ensuite par paliers chaque année pour atteindre 95 g/km (4,0 l/100 km d'essence, 3,6 l/100 de gazole) en 2020. Cette menace est prise très au sérieux par les constructeurs, chaque gramme de dépassement coûtant progressivement de plus en plus cher pour atteindre 95 euros en 2020. Soit, temez-vous bien, largement deux fois plus cher que le gramme d'or.

#### Quatre milliards d'euros d'amende!

Pour fixer les ordres de grandeur, si la réglementation exigible en 2020 avait été appliquée dès 2011, un constructeur comme Daimler AG vendant surtout des berlines luxueuses (Mercedes) mais aussi quelques citadines ultracompactes (Smart) aurait eu à payer près de quatre milliards d'euros. En effet, avec son émission moyenne de 160 g/km en 2010 (6,8 l/100 d'essence, 6,0 de gazole) pour 650 000 véhicules immatriculés, ce serait la colossale pénalité qu'il aurait eu à acquitter.

Il est donc clair que cette règle va être très difficile à respecter pour les constructeurs vendant surtout des voitures de haut de gamme, animées par des mécaniques puissantes. D'où l'impérieuse nécessité pour eux d'investir dans l'innovation, et notamment dans l'allégement. Mais cela ne suffira pas et il leur faudra aussi tabler sur l'électrification de leurs véhicules pour réduire drastiquement la consommation de leurs modèles et donc leurs émissions de CO2.

#### Supercrédit

Pour les pousser plus fermement dans cette direction, l'Union européenne accordera des "supercrédis" aux voitures particulièrement vertueuses. Ainsi, les véhicules émettant moins de 50 g/km de CO2 (2,1 l/100 km d'essence, 1,9 de gazole) - qui ne peuvent être en réalité que des voitures hybrides rechargeables ou de pures électriques - pourront être comptés 2,5 fois en 2014 puis 1,5 fois en 2015 dans la production des constructeurs qui les commercialisent. Les modèles propres viendront donc en déduction des modèles moins propres du même constructeur. De même, de 2020 à 2023, les modèles émettant moins de 35 g/km (1,5 l d'essence, 1,3 l de gazole) pourront être comptés 1,3 fois. D'où l'utilité hautement stratégique pour ceux qui les fabriquent de modèles comme les Renault ZOE et Nissan Leaf (0 g/km), Chevrolet Volt et Opel Ampera (27 g/km), Prius rechargeable (49 g/km), etc. CQFD.



## **4. Les moteurs à cycles asymétriques**

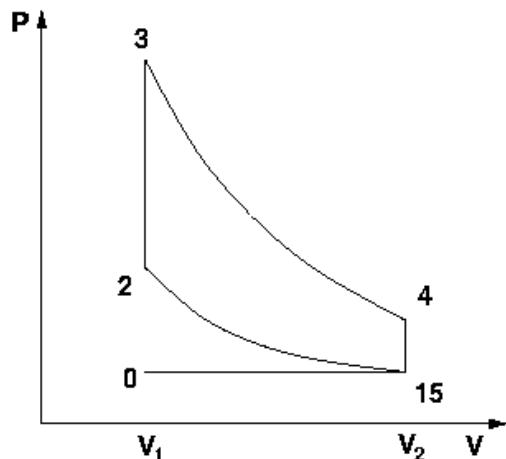




## Qu'est ce qu'un cycle asymétrique ?

### Le cycle Otto ou Beau de Rochas idéal

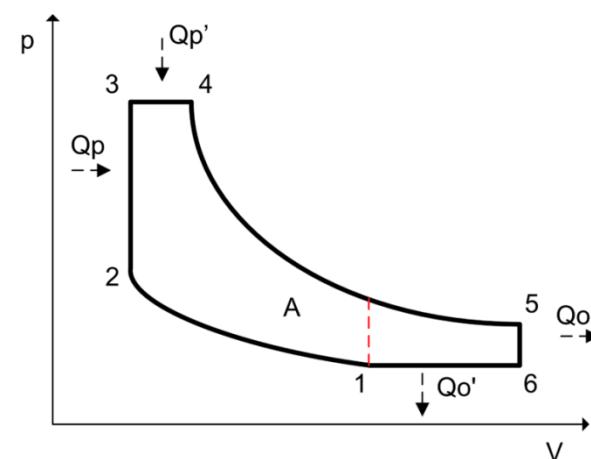
#### Cycle symétrique



- 0-1 Admission isobare
- 1-2 Compression isentropique (adiabatique réversible)
- 2-3 La combustion à volume constant
- 3-4 Détente adiabatique
- 4-5 Ouverture de la soupape isochore
- 5-0 Echappement isobare

### Le cycle Miller/Atkinson idéal

#### Cycle asymétrique



- 1-2 Compression isentropique, 2-3 dégagement de chaleur isochore (piston immobile), 3-4 dégagement de chaleur isobare piston mobile, 4-5 détente isentropique, 5-6 absorption de chaleur isochore, 6-1 absorption de chaleur isobare

Le cycle Atkinson peut être réalisé avec un moteur à 4 temps dans lequel la soupape d'admission est maintenue ouverte au-delà du point mort bas pour permettre l'éjection d'une partie du mélange précédemment admis.

**Le cycle asymétrique Atkinson permet une amélioration du rendement thermodynamique de 7% (cas d'un cycle idéal appliqué à un moteur essence dont les soupapes d'admission restent fermées 60° après le PMB) pour une diminution de la puissance de 20%.**

## Exemple du moteur Toyota à cycle Atkinson pour véhicule hybrides



**Moteur permettant un volume de détente > volume de compression**

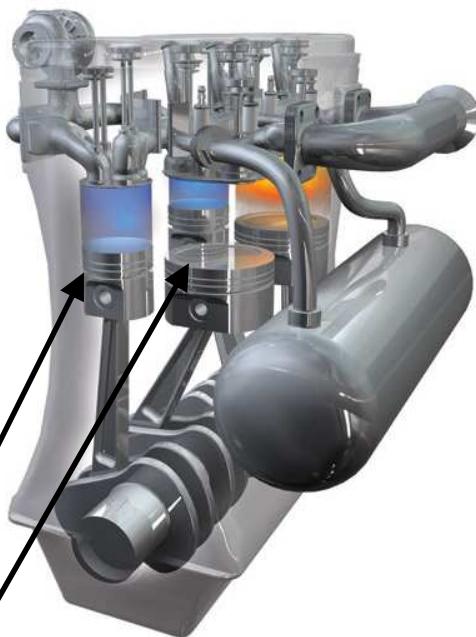
**CSE 220 gr/kw/h**

**Faible ratio Puissance / cylindrée : 40Kw/l**



## Autres approches de moteurs à cycles asymétriques :

Le moteur Scuderi



Moteur Split Cycle

- Cylindre n°1 pour les phases d'admission et de compression
- Cylindre n°2 pour les phases de combustion et de détente

Le moteur EXlink (Extended Expansion linkage engine) de Honda



Volume géométrique de détente

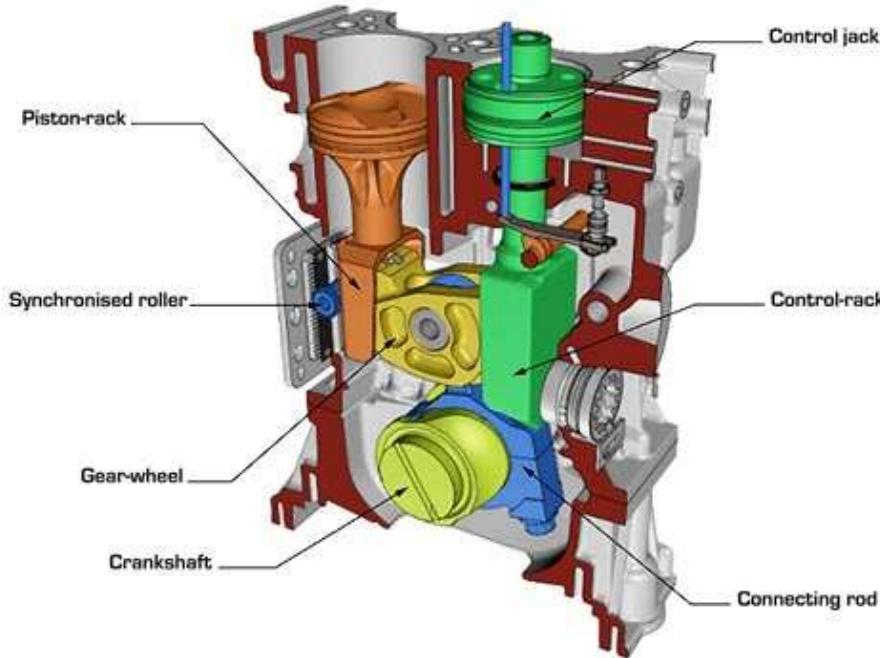
>>

volume géométrique décompression



Il existe une autre voie visant à améliorer le rendement énergétique du cycle thermodynamique : la maîtrise du taux de compression sur chaque point de fonctionnement

Exemple de la technologie MCE-5 (concept VCR le plus avancé) :



Cette approche prometteuse n'entre pas dans la famille des cycles asymétriques.

Pour autant, elle permet d'améliorer le rendement du cycle thermodynamique.



## **5. Le concept « moteur 5 temps SWG »**



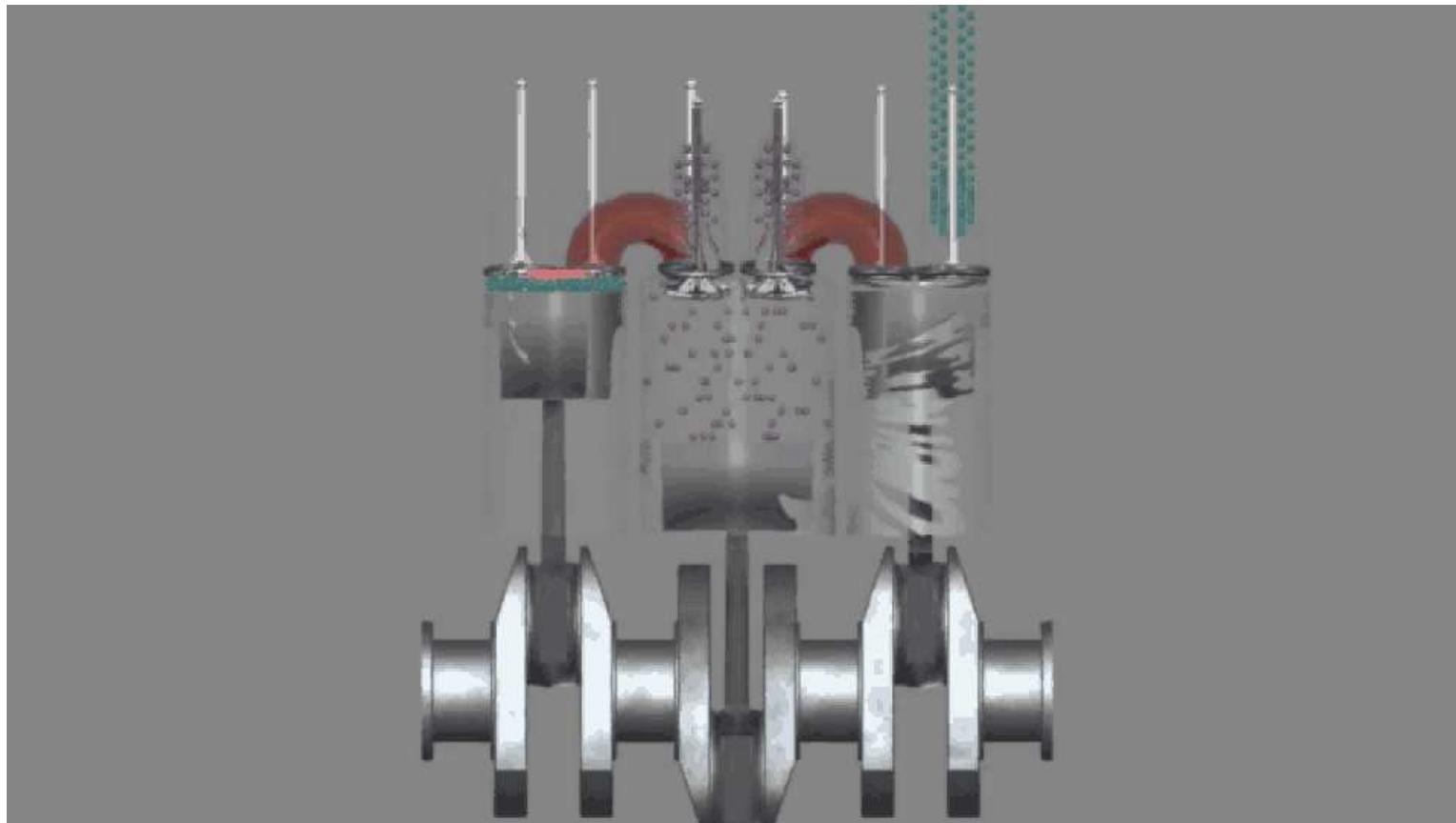
# Le concept « moteur 5 temps SWG »

## L'architecture du moteur 5 temps



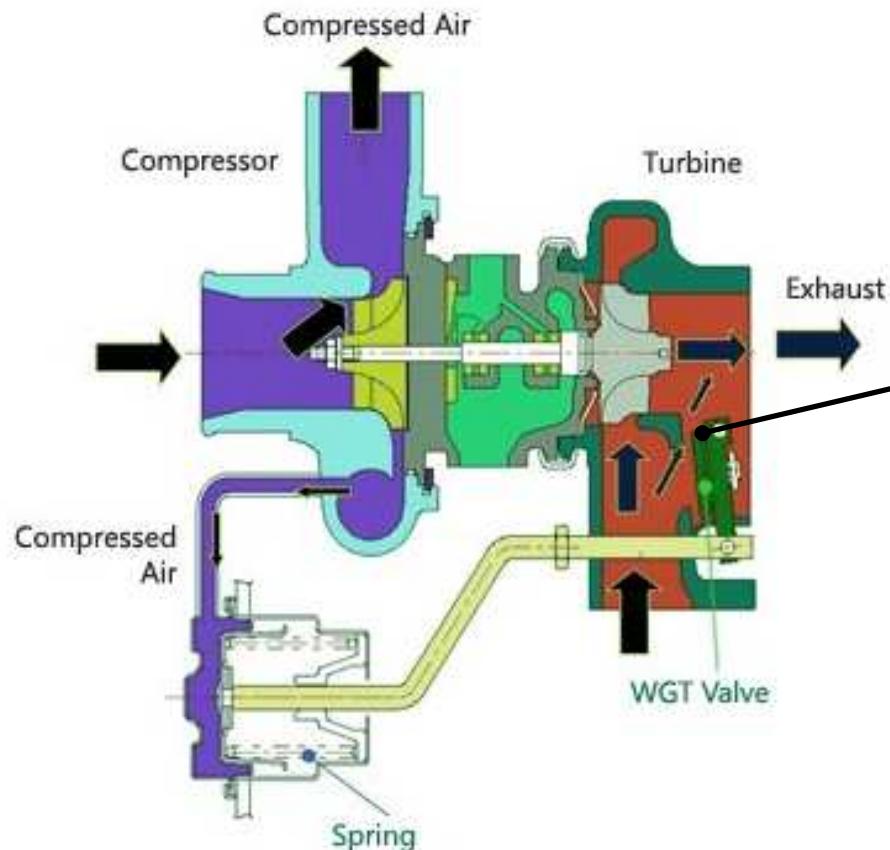
# Le concept « moteur 5 temps SWG »

## Le cycle de Schmitz du moteur 5 temps





## Problématique de fonctionnement d'une WasteGate



Lorsque l'énergie présente dans les gaz d'échappement est trop grande, le turbocompresseur risque la survitesse

Il est alors nécessaire de « **by-pass** » de l'énergie en entrouvrant le clapet de la Waste-gate

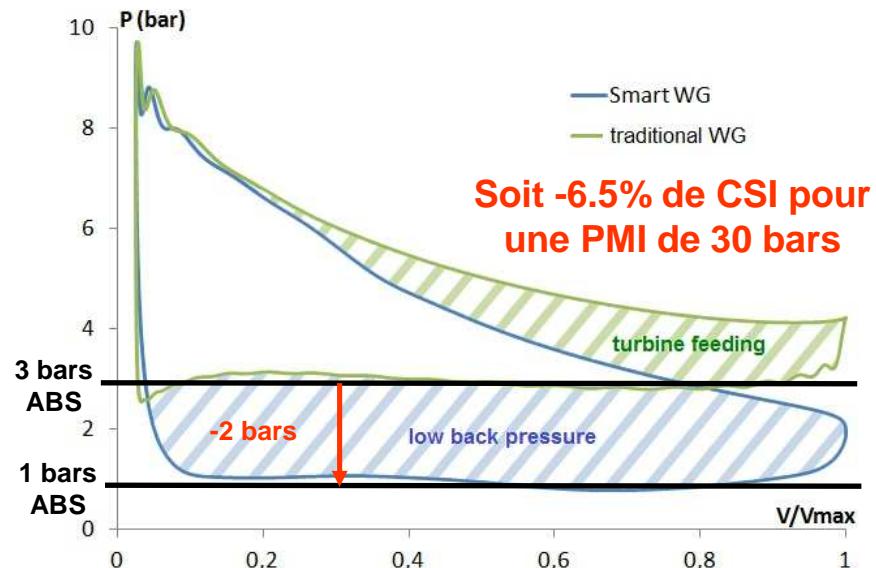
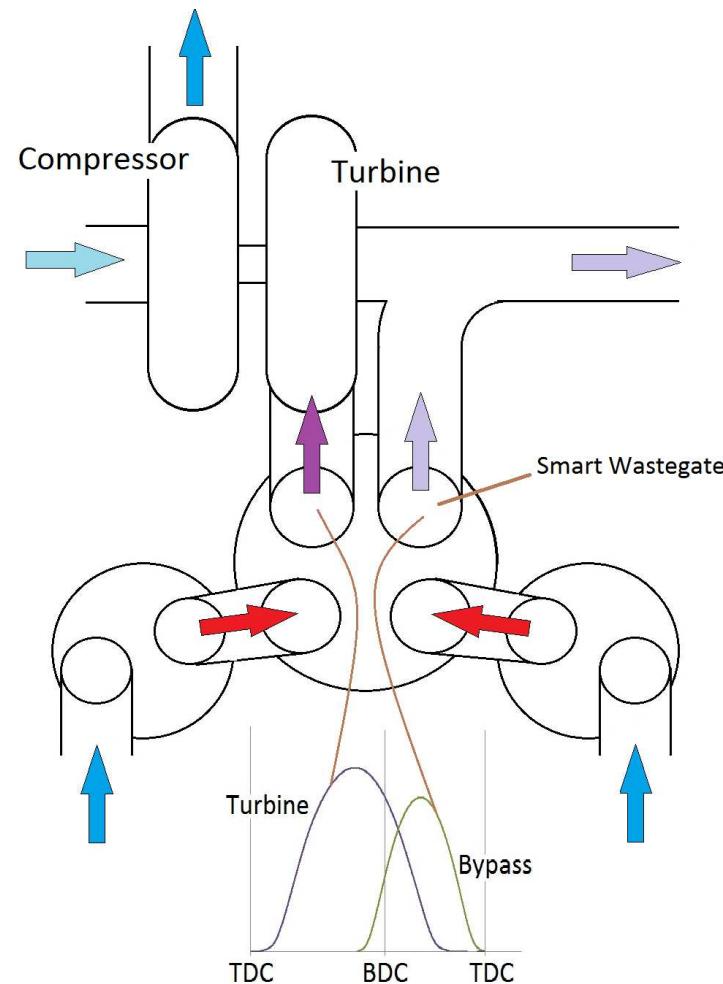
Cette action contraint le moteur à « lutter » contre ce petit orifice pour évacuer les gaz d'échappement

**Conclusion : avec une Wastegate classique, pour évacuer de l'énergie, il faut en dépenser !**



# Le concept « moteur 5 temps SWG »

La Smart-Wastegate (SWG) permet l'alimentation de la turbine tout en assurant une contre pression faible lors de la remontée du piston de détente.

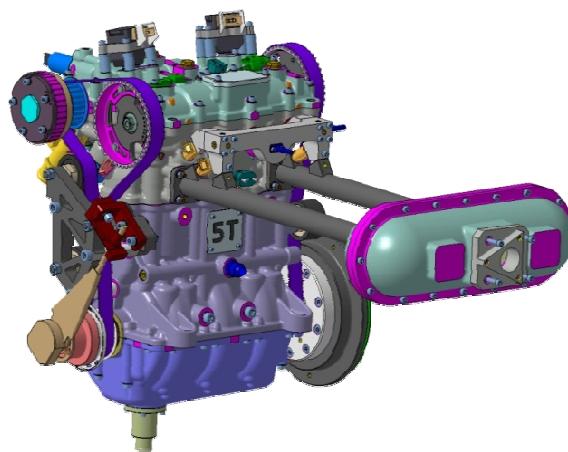


SWG = Réduction de la « pression de pompage » du moteur.

Volume de collecteur d'échappement très faible (35 cm<sup>3</sup>)  
→ Plus grande liberté dans le matching du turbocompresseur.



## **5. Programme « Proof of concept moteur 5T-SWG laboratoire »**



**Objectifs du programme réalisé en 2011 et 2012 par Danielson  
Engineering / ID-MOTION :**

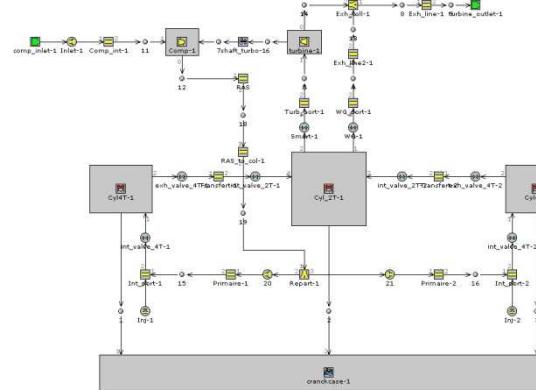
- Modéliser le cycle 5 temps SWG
- Etudier un moteur démonstrateur 5 temps SWG « laboratoire »
- Réaliser un moteur démonstrateur 5 temps SWG « laboratoire »
- Caractériser au banc d'essais un moteur démonstrateur SWG « laboratoire »
- Corréler les modèles de calculs aux résultats expérimentaux

**Remarque importante : Ce programme n'a pas pour objectif de réaliser un « Score consommation » à ce stade, mais de démontrer la faisabilité technique et le potentiel du concept.**

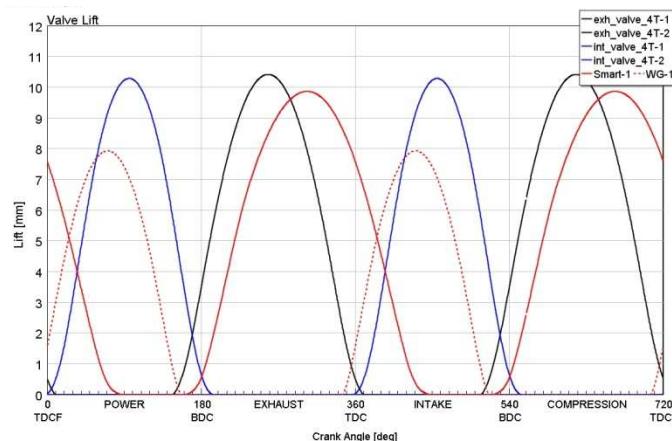


## Etape n°1 : la modélisation 0D / 1D

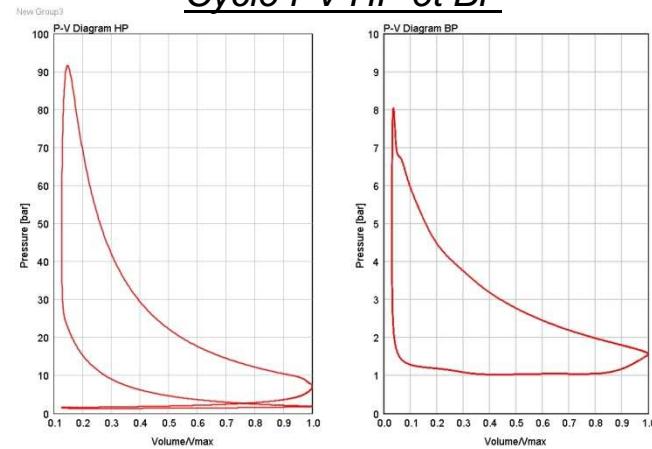
*Modèle GT POWER*



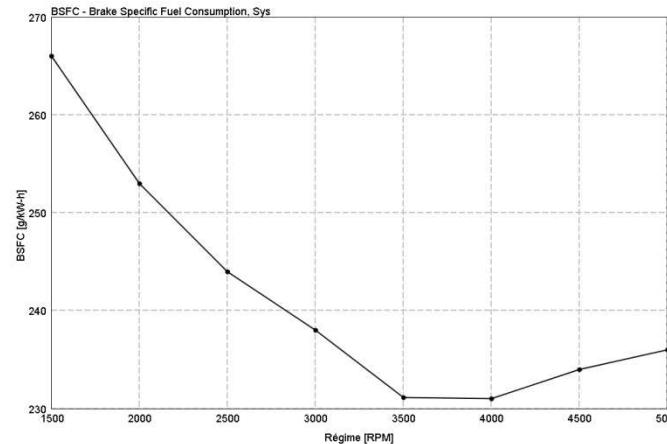
*Diagramme de distribution*



*Cycle PV HP et BP*



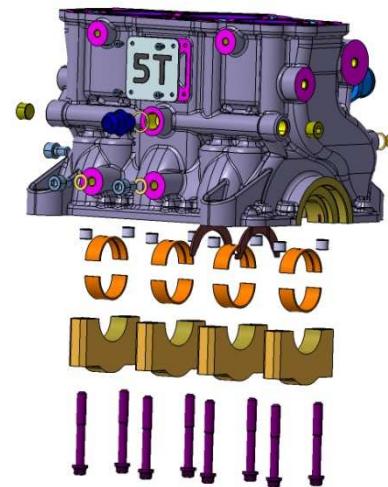
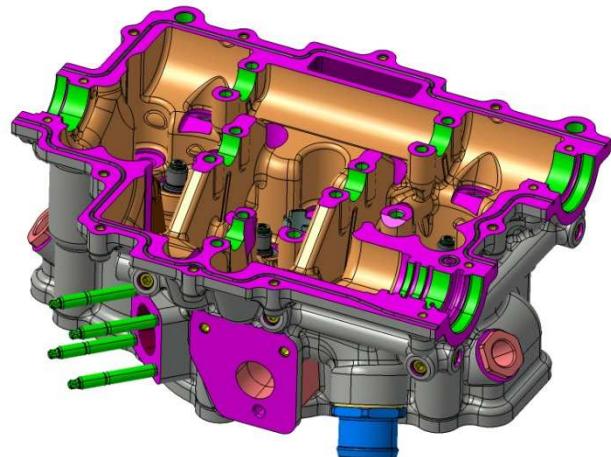
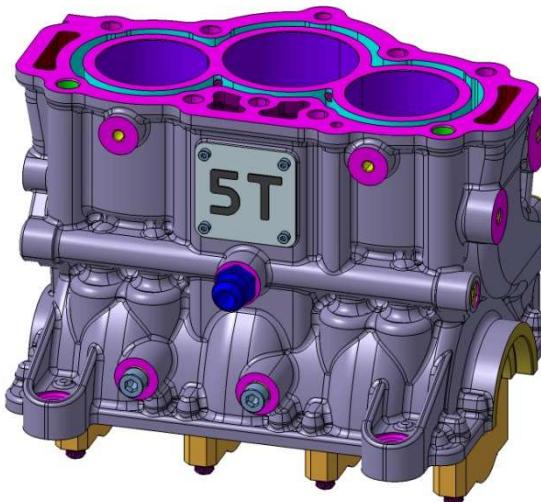
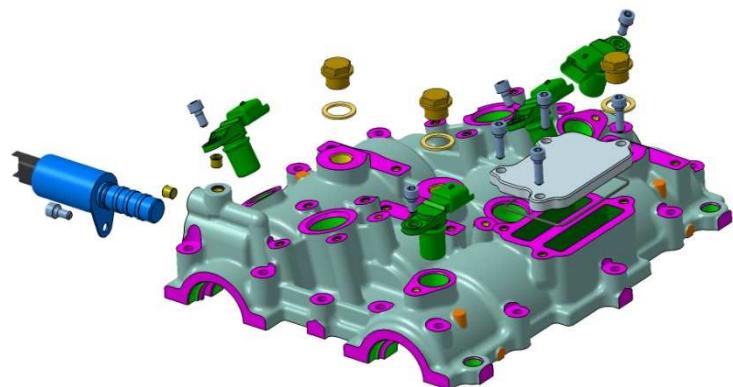
*CSE calculées*



Détermination des principaux paramètres techniques



## Etape n°2 : L'engineering du moteur 5 temps SWG



0.78

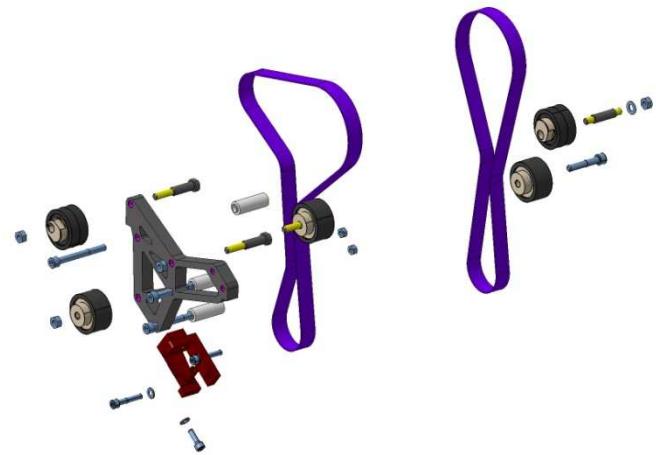
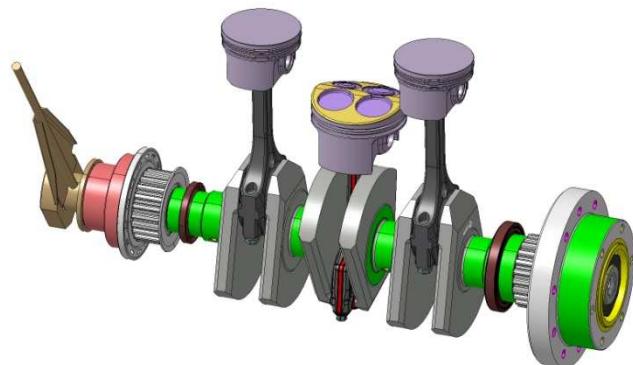
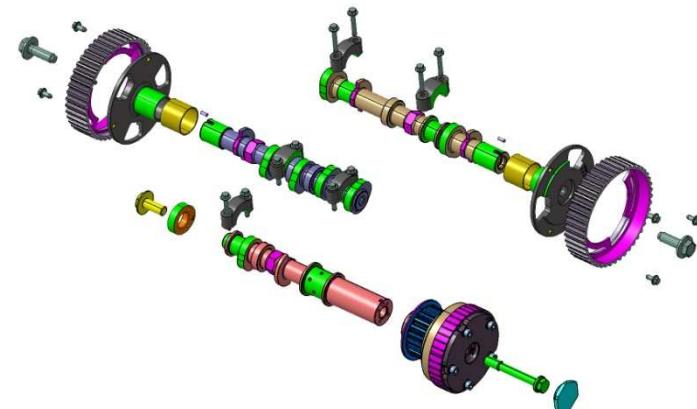
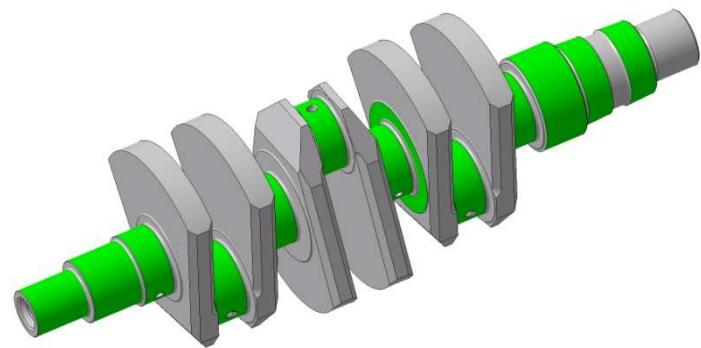
0.78

0.009

0.401



## Etape n°2 : L'engineering du moteur 5 temps SWG

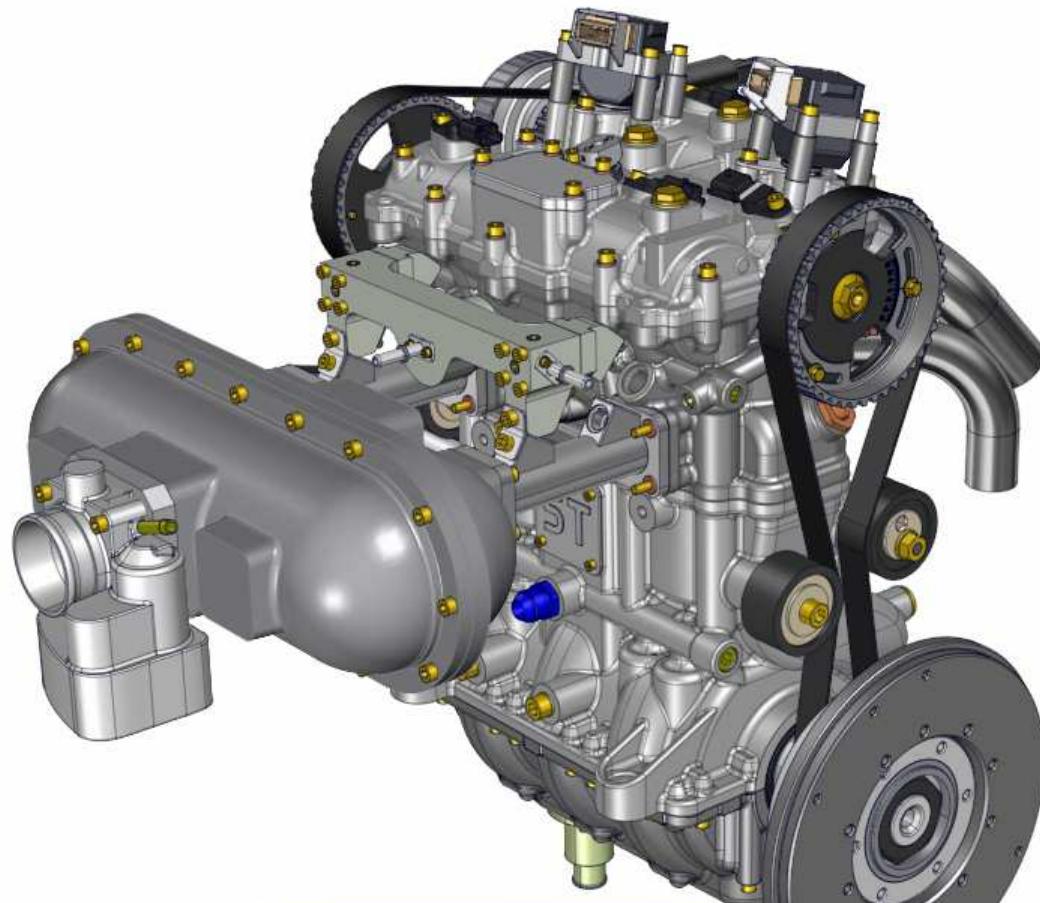


0.396

0.399



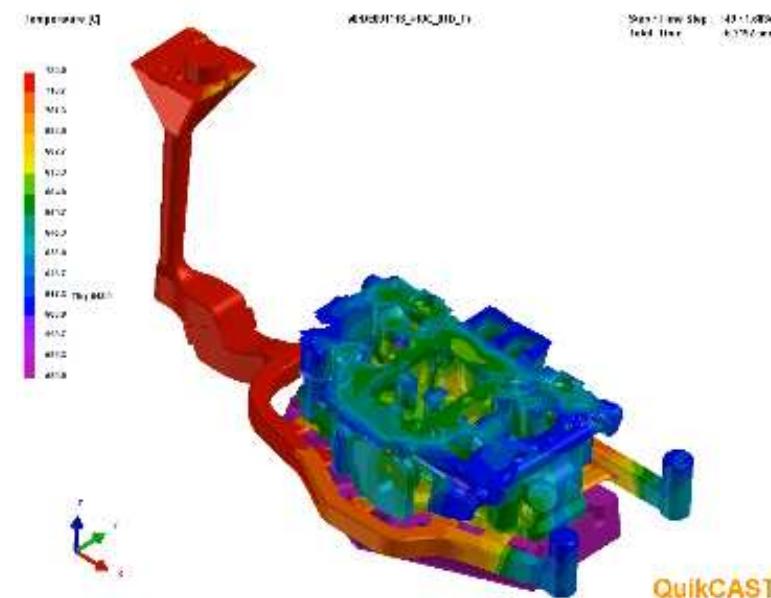
## Etape n°2 : L'engineering du moteur 5 temps SWG



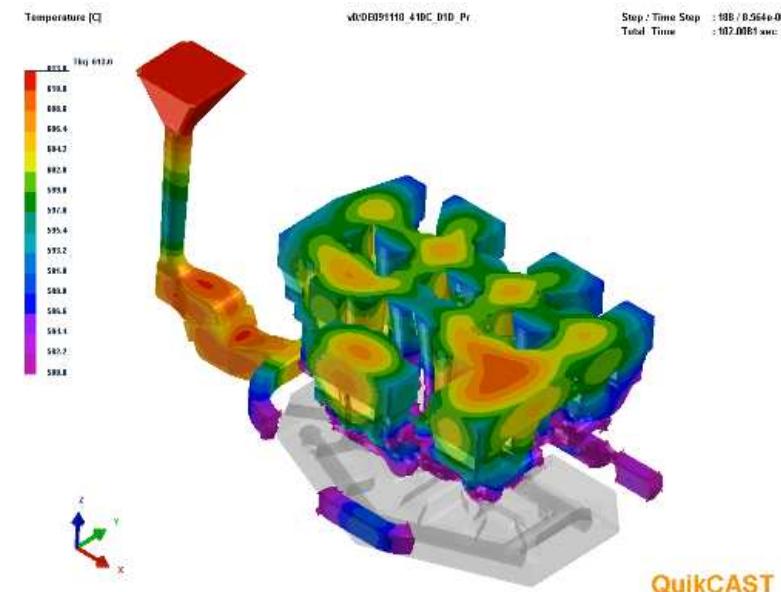


Etape n°3 : le prototypage (méthode fonderie) du moteur 5T-SWG « laboratoire »

Simulation remplissage culasse

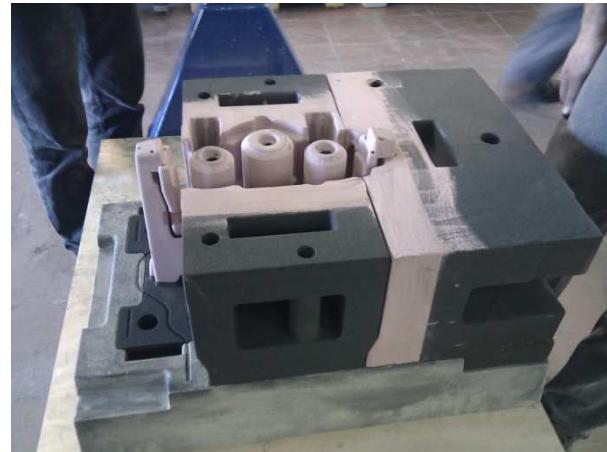


Simulation solidification culasse



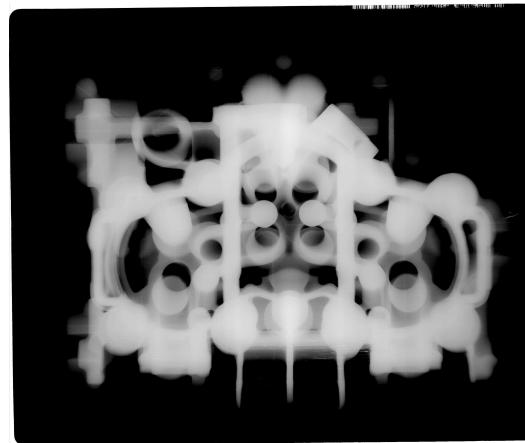
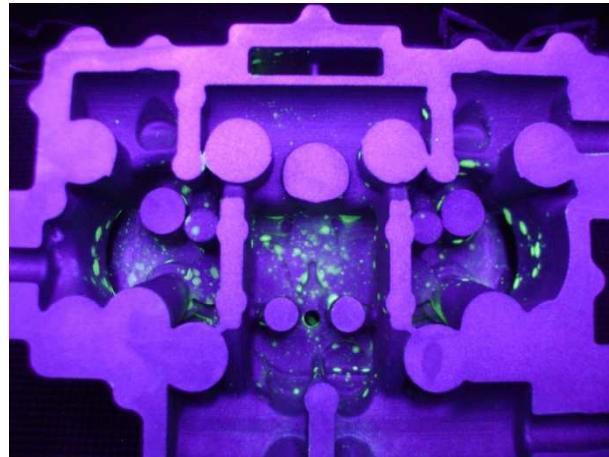
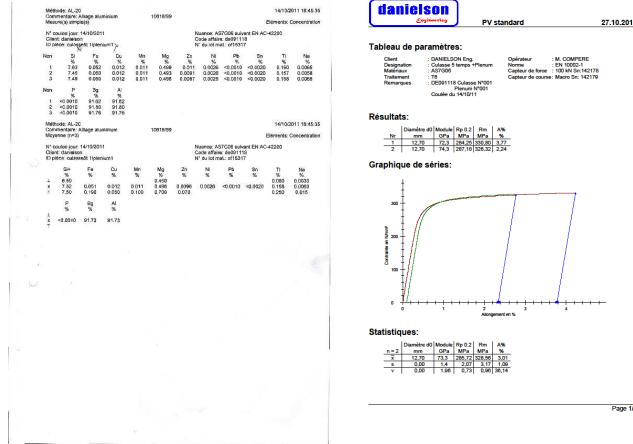
Le processus d'obtention des pièces de fonderie est systématiquement simulé et optimisé en 3D (remplissage + solidification)

### Etape n°3 : le prototypage (fonderie) du moteur 5T-SW G « laboratoire »





## Etape n°3 : le prototypage (Assurance qualité fonder ie) du moteur 5T-SWG « laboratoire »



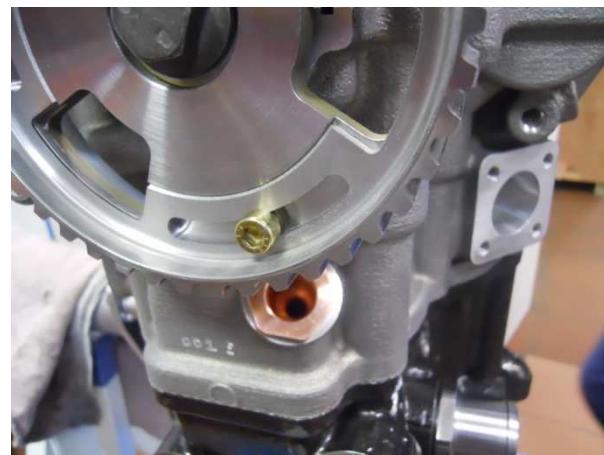


**Etape n°4 : le prototypage (usinage) du moteur 5T-SW G « laboratoire »**



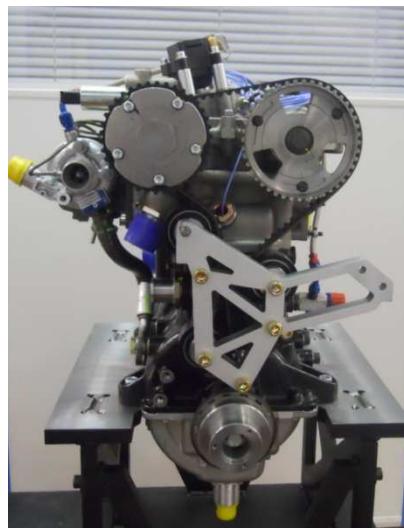


**Etape n°5 : le prototypage (assemblage) du moteur 5T- SWG  
« laboratoire »**





**Etape n°5 : le prototypage (assemblage) du moteur 5T- SWG  
« laboratoire »**



**Etape n°7 : Mise en œuvre du programme d'essai au banc  
du moteur 5T-SWG « laboratoire »**



**CAMPAGNE D'ESSAIS**

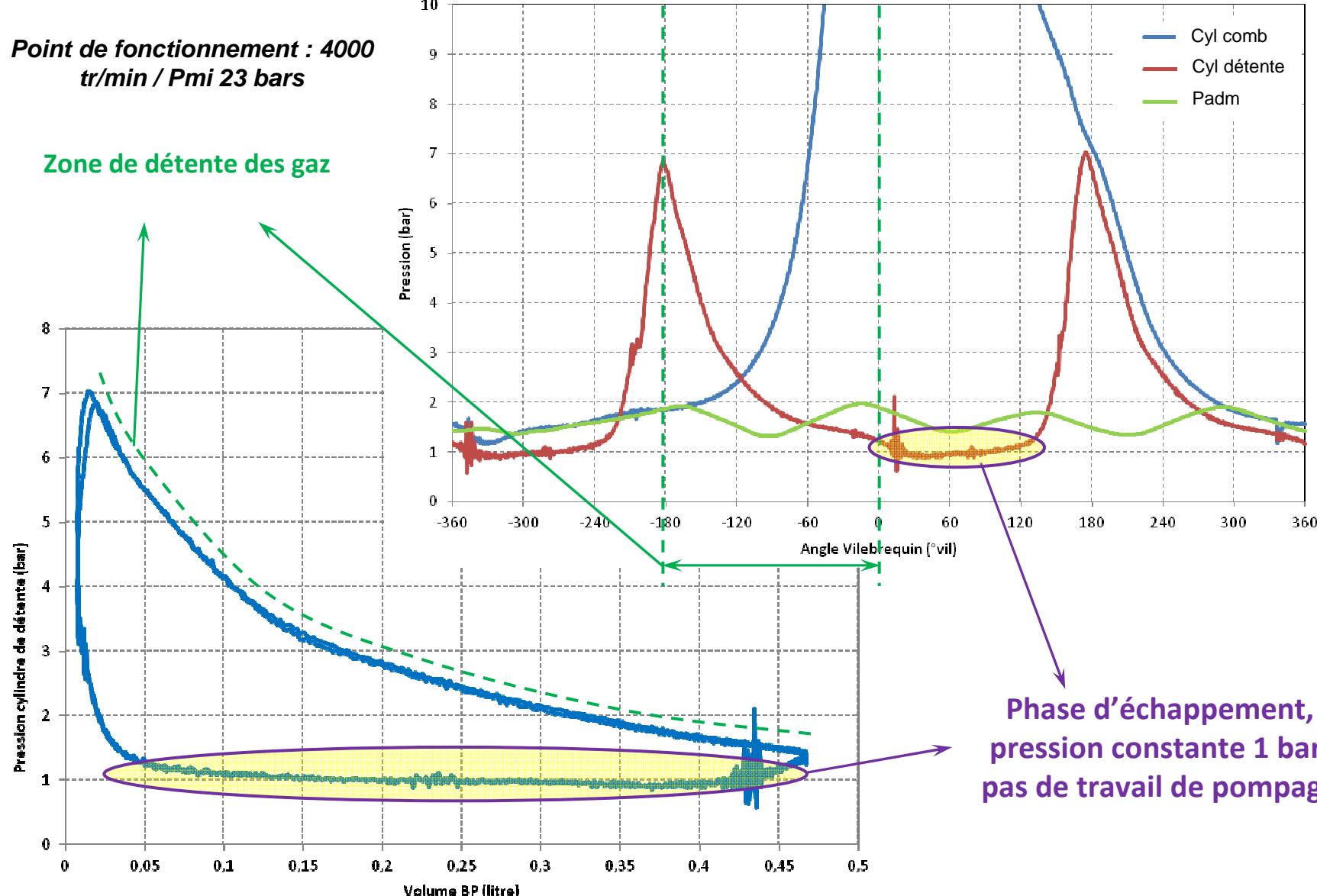
*18 semaines d'essais en 2012  
Emission de 2 rapports d'essais*



Visualisation expérimentale du cycle 5 temps SWG

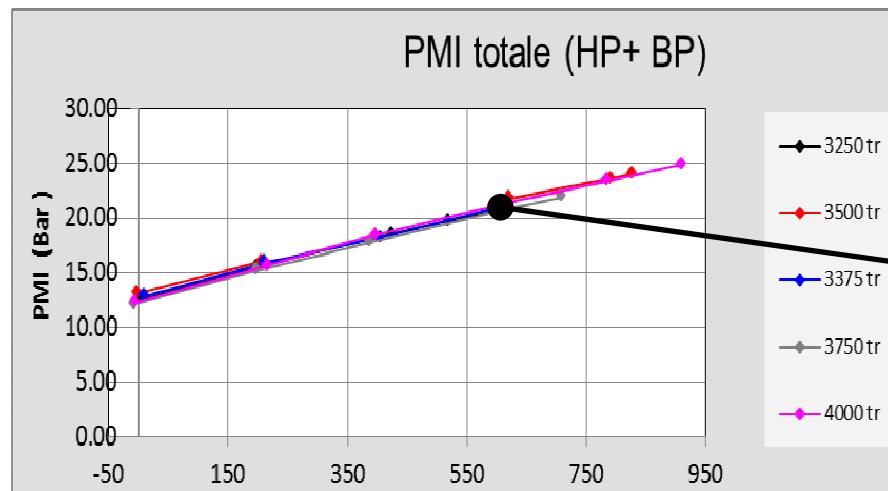
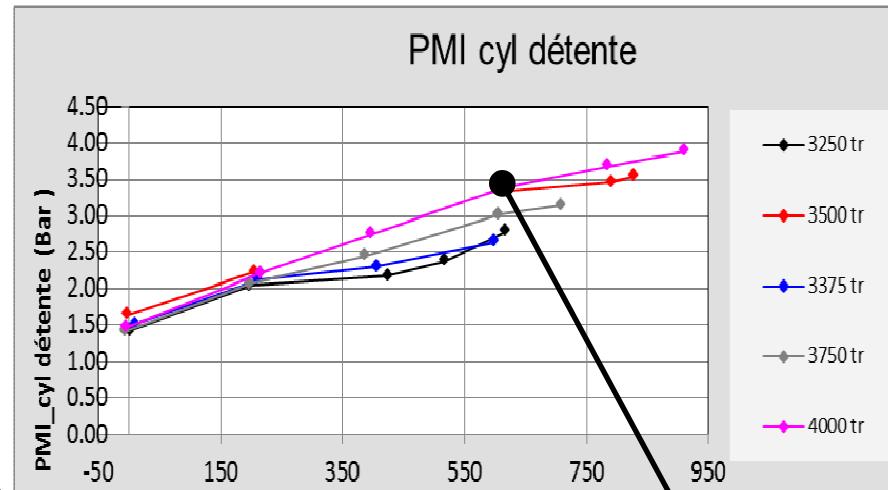
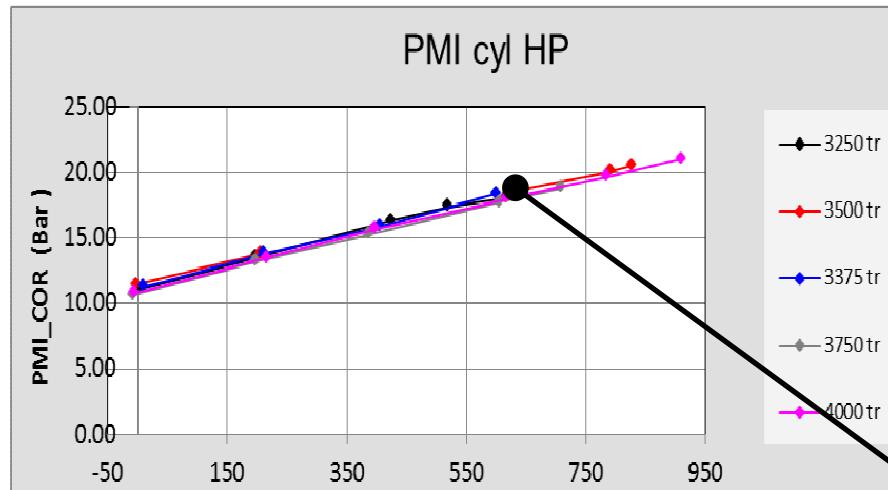
Point de fonctionnement : 4000  
tr/min / Pmi 23 bars

Zone de détente des gaz





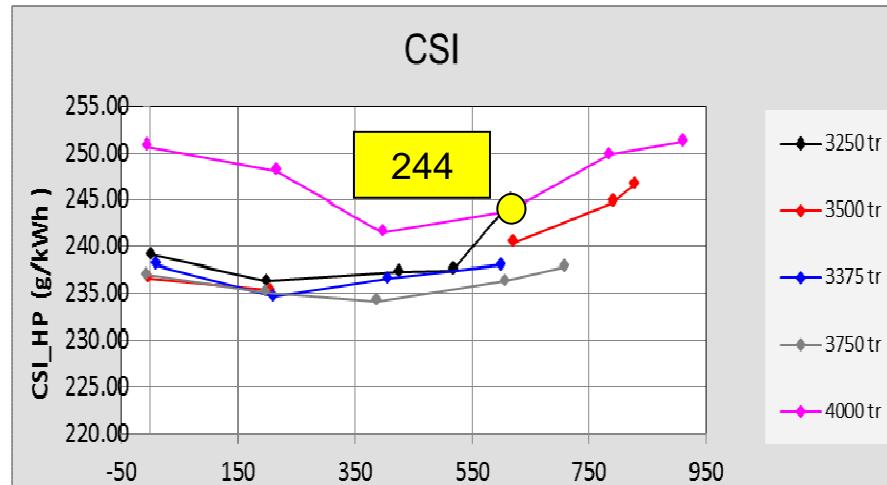
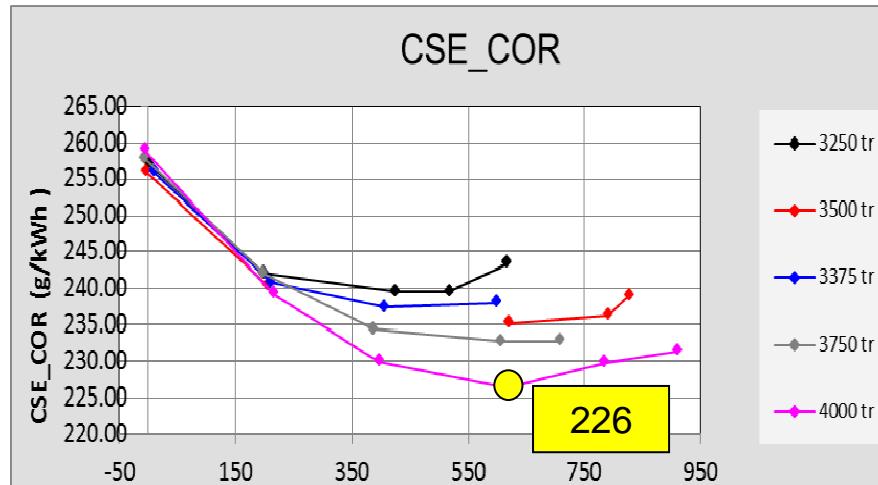
## Etape n°7 : Mise en œuvre du programme d'essai au banc du moteur 5T-SWG « laboratoire »



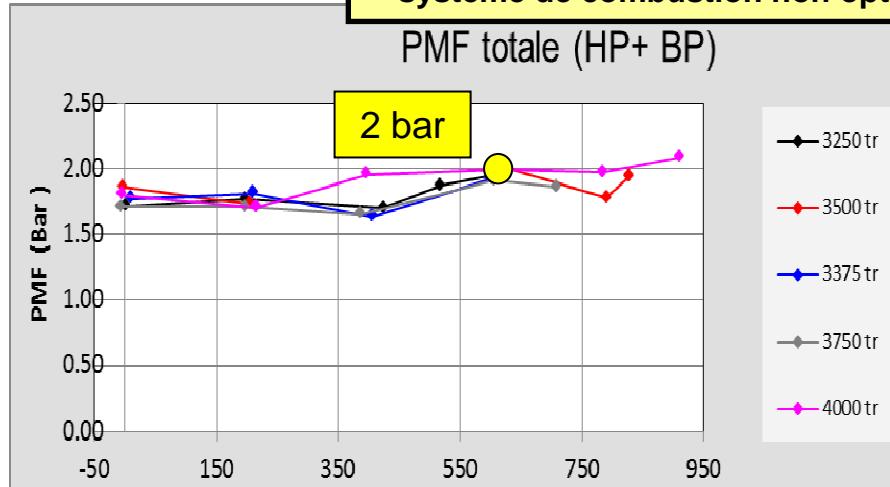
Configuration :  
**PMI cyl HP : 18,01 bars**  
**PMI cyl détente : 3,40 bars**  
**PMI totale : 21,41 bars (18,01+3,40)**  
**Soit une augmentation du rendement indiqué de 19%**  
**(21,41 / 18,01)**



## Etape n°7 : Mise en œuvre du programme d'essai au banc du moteur 5T-SWG « laboratoire »



Cette CSE est obtenue avec une CSI du système de combustion non optimisée



### Configuration :

Moteur injection indirecte essence

2 soupapes / Cylindre

CSI réalisée 244 gr/Kw.h

CSE réalisée : 226gr/Kw.h

La CSE du moteur < CSI des cylindres de combustion malgré une PMF de 2 bars !

## Bilan du programme

### Proof of concept moteur « 5T-SWG laboratoire »

- **Les verrous technologiques ont été levés**
- **Le système de détente prolongée permet d'accroître le rendement du cycle (une partie de l'enthalpie présente à l'échappement a bien été transformée en travail mécanique)**
- **Le système de Smart WasteGate fonctionne**
- **La suralimentation d'un moteur de 35 Kw avec un turbocompresseur du commerce est possible avec un fonctionnement très pulsé**
- **Nous avons construit une modélisation 0D/1D recalée sur les essais**



## **8. Optimisation numérique du moteur 5T-SWG**



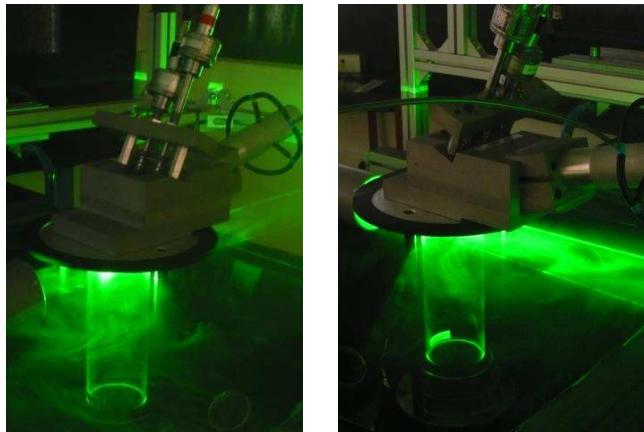
*Programme en cours avec le soutien de :*



## Optimisation du cycle 3D (Converge CFD + Calculateur HPC)

### Moyens expérimentaux (ID-MOTION) :

Soufflerie laser PIV stéréoscopique



Banc de caractérisation d'injecteurs



### Moyens de simulations numériques

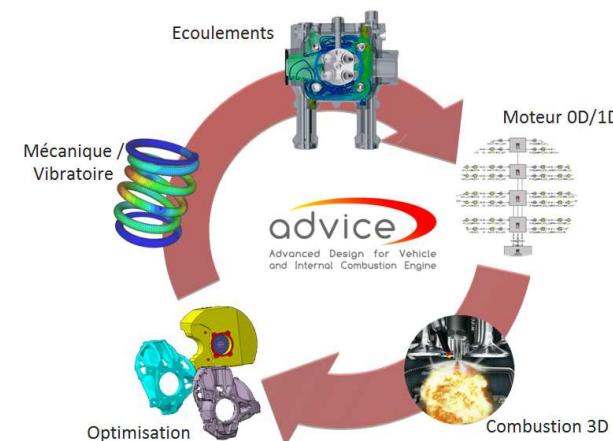
Danielson Engineering :

HPC :

192 cœurs 3.5  
Tflop et 1To  
Ram



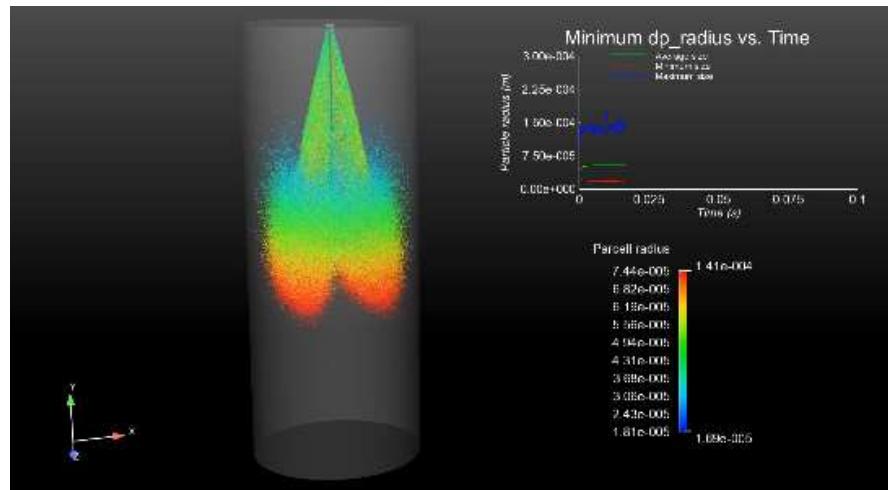
### Outils de simulation de combustion ConvergeCFD





## Programme de calculs 3D en cours de réalisation par Danielson Engineering

Modélisation et corrélation expérimentale de l'injection

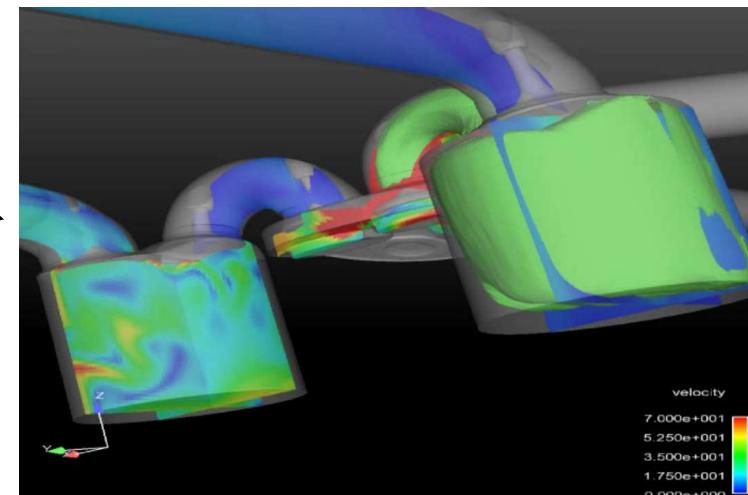


Ces calculs sont recalés avec les données expérimentales mesurées avec le banc d'injection

Modélisation et optimisation du cycle 5T-SWG

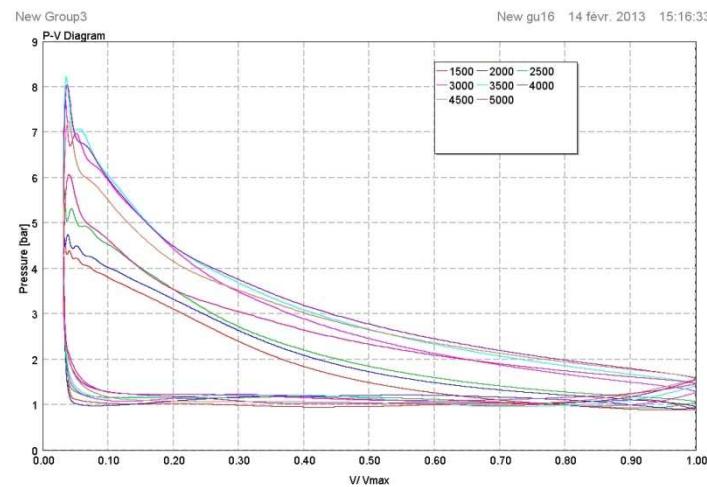
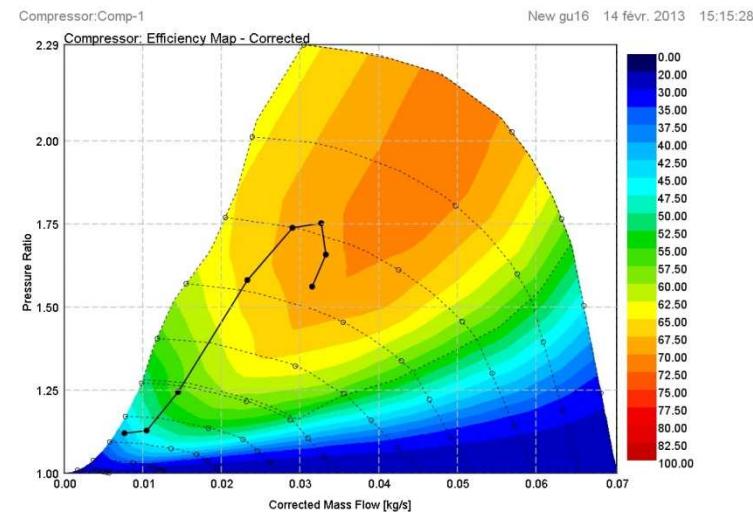
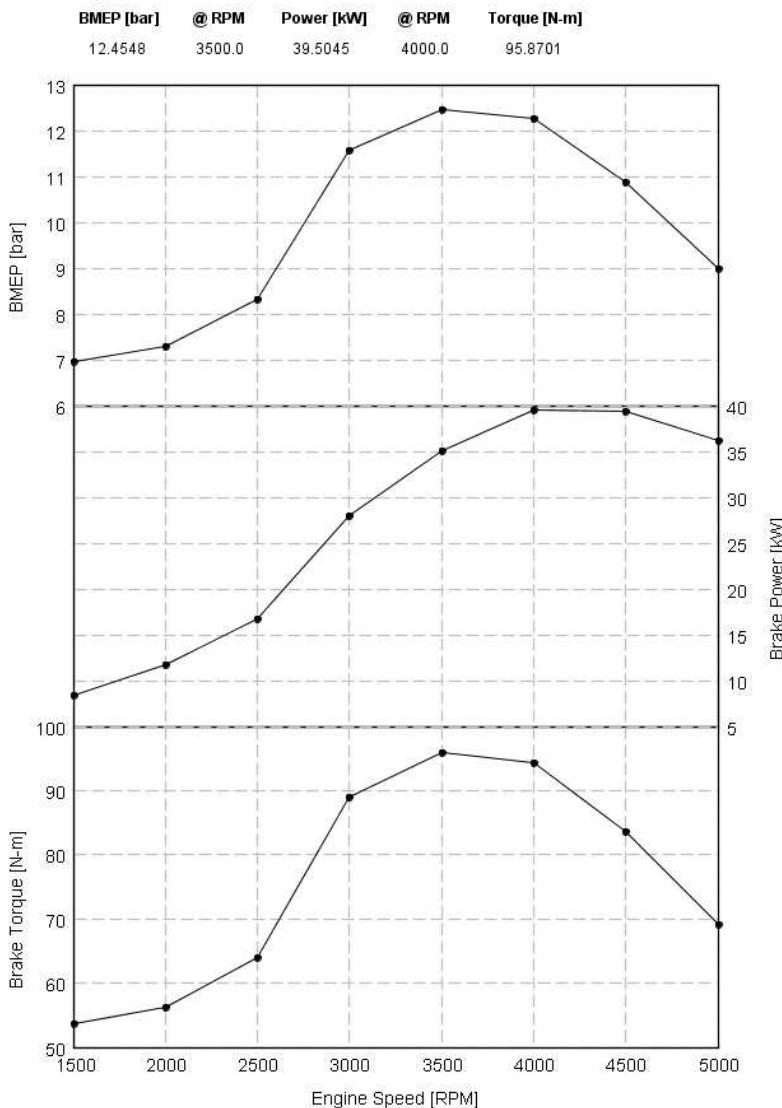
(avec ces 2 systèmes de combustion)

Cette approche calcul 3D permet d'optimiser globalement le rendement du cycle 5 temps SWG



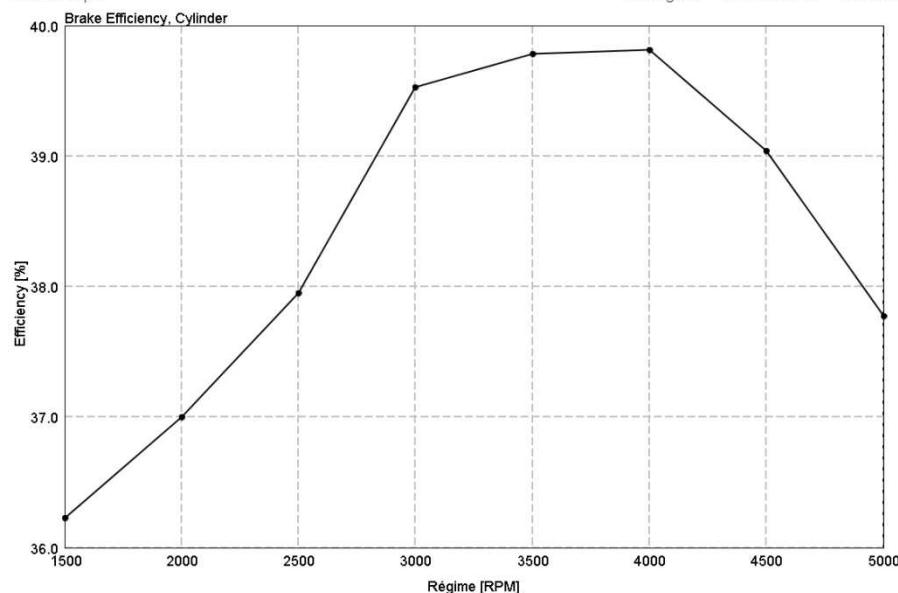
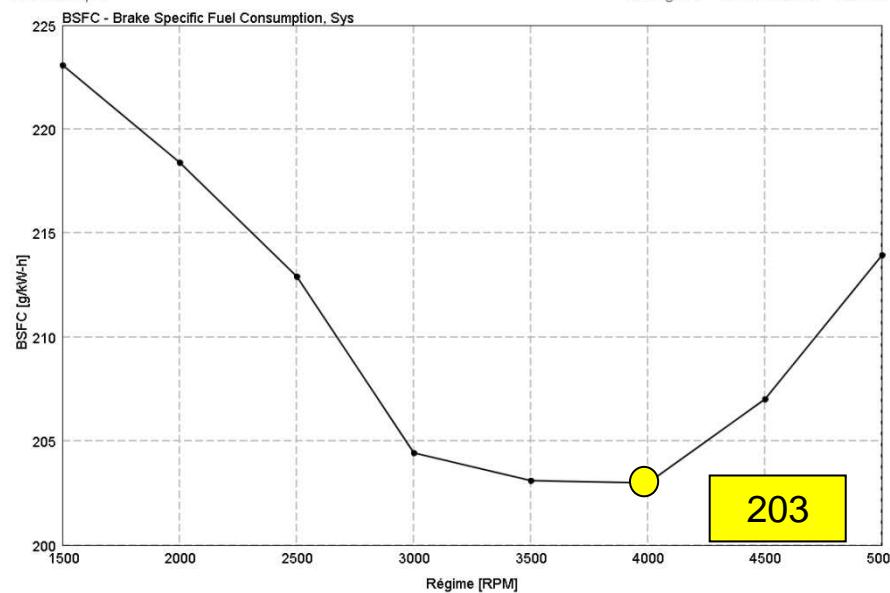


## Optimisation du cycle 0D/1D (GT-POWER)





## Optimisation du cycle 0D/1D (GT-POWER)



### Configuration du moteur optimisé :

- Injection indirecte essence
- 2 cylindres de combustion de 250 cm<sup>3</sup> chacun (1 soupape d'admission + 1 soupape d'échappement)
- 1 cylindre de détente de 500 cm<sup>3</sup>
- 1 turbocompresseur à SWG

**La CSE du moteur optimisée numériquement est de 203 gr/Kw.h (vs 226 gr/Kw.h sur le moteur laboratoire)**

**La puissance spécifique atteignable est de 60 Kw/l**



## **8. Analyse comparative du concept 5T-SWG**

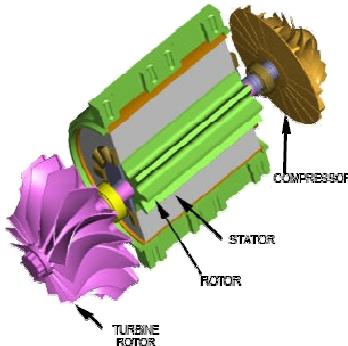




### 5T-SWG vs Cycle Atkinson à fermeture soupape admission retardée :

Le gisement de CSI du 5T-SWG est plus important : 19% vs 7%

La densité de puissance du 5T-SWG est supérieure : 60Kw/l vs 40Kw/l



### 5T-SWG vs Turbo-compound :

Le turbo-compound et le 5T-SWG valorisent l'enthalpie à l'échappement

Le turbo-compound ne permet pas d'accroître le rendement du cycle

Le turbo-compound nécessite de développer une brique technologique coûteuse et spécifique  
(moteur électrique à très haute vitesse)

**Le 5T-SWG permet d'améliorer le rendement du cycle ET de valoriser l'enthalpie des gaz d'échappement sans avoir à développer de nouvelle brique technologique**

## Le positionnement économique du 5T-SWG par rapport à la gamme actuelle des moteurs automobiles

### Hypothèses de travail :

- ✓ Puissance des moteurs : 70/80 Kw (Segment C)
- ✓ PRF comprenant le système d'injection
- ✓ PRF comprenant le système de post traitement
- ✓ Valeurs moyennes

Désignation	Cout moyen de production	Meilleure CSE	Densité de puissance
	Euro	Gr/Kw.h	Kw/l
Moteur 4 temps essence	1250	225	60
Moteur diesel	2200	210	55
Moteur 5 temps	1100/1400	210 (*)	60

(\*) Hypothèse réaliste

**Le rapport Coût / Prestation du 5T-SWG  
est particulièrement bien positionné**



## Les points forts du concept 5 temps SWG :

- Accroissement du rendement thermodynamique (+19% mesuré expérimentalement)
- Densité de puissance identique à un moteur à 4 temps (supérieure à un moteur à cycle Atkinson)
- Grande liberté de matching du turbocompresseur, suralimentation possible dès 30 Kw de puissance (le volume du collecteur d'échappement est 20 fois plus petite que pour un moteur 4 cylindres 4 temps)
- Le concept 5 temps SWG est compatible avec tout type de carburant
- Pas de nouvelle brique technologique à développer
- Le système de post traitement ne requiert aucune spécificité par rapport à un moteur essence 4 temps
- Valorisation de l'enthalpie à l'échappement intégrée dans la base moteur, pas de machine extérieure aux carters (moindre complexité, moindre encombrement, meilleure fiabilité)
- Ne nécessite pas un système de combustion très évolué (l'injection directe n'est pas indispensable pour atteindre des niveaux de CSE compétitifs)
- La démonstration de principe a été effectuée avec succès en 2012 par ID Motion (Danielson Engineering / ISAT)
- Le potentiel de CSE atteignable est <210 gr/Kw/h avec un système d'injection indirecte (le niveau actuel de CSE d'un moteur diesel automobile)

**Le ratio Coût / CSE / Encombrement / Masse du moteur 5T-SWG est compétitif**

## **8. Les applications industrielles potentielles**





## Les applications industrielles potentielles

L'automobile



L'aéronautique



Le transport maritime



Les applications Racing



Le transport routier



Le off road



## Merci de votre attention



Frédéric SIROT  
Directeur de branche  
[fredéric.sirot@danielson-eng.fr](mailto:fredéric.sirot@danielson-eng.fr)



**Pour aller plus loin :**

- Article SIA : [http://www.sia.fr/dyn/publications\\_detail.asp?codepublication=R-2011-08-29](http://www.sia.fr/dyn/publications_detail.asp?codepublication=R-2011-08-29)
- Danielson Engineering : <http://www.danielson-eng.fr/>
- ID-Motion : [http://www.isat.fr/assets/files/recherche/com\\_id-motion.pdf](http://www.isat.fr/assets/files/recherche/com_id-motion.pdf)
- Auto innovation : <http://www.auto-innovations.com/site/brevetech/moteur5t.html>
- Gerhard SCHMITZ : <http://moteur-5-temps.com/>